

Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería

www.elsevier.es/rimni



Un modelo de difusión anisótropa para el estudio del tráfico urbano

V.H. Cortínez^{a,b,*} y P.N. Domínguez^{b,c,*}

^a Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), Argentina

^b Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, Argentina

^c Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada, Universidad Tecnológica Nacional (FRBB), 11 de Abril 461, B8000LMI, Bahía Blanca, Argentina

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 16 de marzo de 2011

Aceptado el 18 de octubre de 2011

On-line el 1 de marzo de 2013

Palabras clave:

Tráfico urbano

Difusión anisótropa

Modelo continuo de tráfico

R E S U M E N

En el diseño de nuevas redes de transporte, o en el rediseño de las existentes, resulta de gran utilidad el empleo de modelos matemáticos para predecir los efectos de las modificaciones que se pretende implementar. Tales modelos permiten determinar los flujos vehiculares y los tiempos de viaje en cada tramo de la red a partir del conocimiento de las características de la misma y de la demanda (cantidad de viajes entre diferentes puntos de la ciudad) y están basados en una ley fenomenológica del comportamiento social colectivo de los conductores denominada principio de Wardrop. Se trata de un problema de optimización de gran tamaño, en general muy exigente desde el punto de vista computacional.

Con miras a acelerar tal proceso de cálculo, en este trabajo se propone un modelo continuo de tráfico urbano. La idea fundamental de este último es que la variación de las características del tráfico en áreas cercanas es pequeña cuando se la compara a las diferencias del sistema entero, y de esta manera se pueden utilizar funciones continuas para representar las características de la red, tales como el costo de viaje y el flujo vehicular. Esencialmente el problema se reduce a un sistema de ecuaciones de difusión anisótropa no lineal que puede ser adecuadamente resuelto mediante el método de elementos finitos. La eficiencia del nuevo modelo se estudia a partir de una comparación con resultados obtenidos mediante el enfoque clásico. Se muestra que los resultados son similares aunque el tiempo de cálculo sea ostensiblemente menor.

© 2011 CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya). Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

An anisotropic diffusion model for the study of the urban traffic

A B S T R A C T

Keywords:

Urban traffic

Anisotropic diffusion

Continuum traffic model

In order to design or redesign urban transportation networks, the employment of mathematical models is very useful for predicting the effects of possible modifications of implementing. Such models allow the determination of vehicular flows and travel times for every link of the network from the knowledge of its inherent features and the corresponding traffic demand. They are based on a phenomenological law of the social collective behavior of the drivers called Wardrop principle. It is an optimization problem, in general, very demanding from the computational point of view.

In order to accelerate the computation process, in this paper, a continuum model for the urban traffic is proposed. The fundamental assumption behind this theory is that the variation of network properties is small in close regions when compared with the full system. Accordingly, it is possible to use continuous functions for representing travel times or vehicular flows. Essentially, the problem is formulated as a system of non-linear anisotropic diffusion (differential) equations that can be conveniently solved by means of the finite element method. The efficiency of the proposed model is studied by means of a comparison with results obtained with the classical optimization approach. As shown, the results are similar although the computation times are significantly reduced.

© 2011 CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya). Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

1. Introducción

La congestión de tráfico es un problema cotidiano para los habitantes de las grandes ciudades. En ciertas horas, el incremento de la cantidad de vehículos en la red de transporte produce demoras en

* Autor para correspondencia.

Correos electrónicos: vcortine@frbb.utn.edu.ar (V.H. Cortínez), pdoming@uns.edu.ar (P.N. Domínguez).

la circulación y un aumento de la contaminación que afectan física y anímicamente a los conductores y a los habitantes en general. Lograr un tráfico fluido que minimice las consecuencias negativas de la congestión es una de las principales preocupaciones de los diseñadores de las redes de transporte. En la planificación de nuevas redes o la modificación de las existentes se utilizan modelos matemáticos que permiten obtener patrones de flujo y tiempos de viaje de acuerdo a la disponibilidad de rutas y servicios, a la demanda (cantidad de viajes desde un punto a otro de la ciudad) y a criterios de selección de rutas por parte de los usuarios. En uno de los más utilizados de estos criterios, se asume que el comportamiento colectivo de los usuarios se basa en el denominado primer principio de Wardrop [1] o principio del equilibrio del usuario, según el cual todos los conductores elegirán las rutas de mínimo tiempo (o costo) de recorrido y ninguno podrá experimentar un tiempo menor utilizando otra ruta.

A partir de tal principio puede formularse el denominado problema de asignación de viajes, cuyas incógnitas corresponden a los flujos de tráfico circulando en cada una de las arterias con destinos diferentes, así como a los tiempos de viaje entre orígenes y destinos.

Para ello, la ciudad se divide en zonas donde las características de demanda son relativamente homogéneas y se asume que toda la actividad de las mismas se concentra en puntos denominados «centroides» que generan y atraen los viajes hacia y desde otras zonas. Matemáticamente, la red de transporte se modela como un grafo dirigido en el que los tramos de ruta (pueden corresponder a tramos de avenidas, calles o autopistas) constituyen los arcos, enlaces o *links*, mientras que sus intersecciones y los «centroides» son los nodos. Los arcos tienen asociadas funciones que representan el costo de viajar a través de ellos. Este costo (en general el tiempo de viaje) es una función creciente del flujo vehicular que se ajusta experimentalmente, aunque existen expresiones generales que son extensamente usadas y dependen de características particulares de las vías consideradas.

Con estos datos es posible construir un problema de optimización equivalente al primer principio de Wardrop [1], tal como el propuesto por Beckmann et al. [2], cuya solución corresponde a los flujos vehiculares en cada arco de la red, así como a los tiempos de viaje entre cualquier origen y el correspondiente destino. Este y otros enfoques similares han sido ampliamente utilizados por diferentes autores en los problemas de diseño y gestión de redes de transporte [3–6]. Los autores del presente trabajo utilizaron la formulación esbozada, denominada aquí «enfoque clásico», en el estudio de la optimización de flujos de tránsito considerando aspectos ambientales [7]. Cuando las redes son muy grandes, el incremento tanto de nodos y arcos como de puntos de origen y destino aumentan exponencialmente el tiempo de cálculo.

Un enfoque diferente y menos explorado es la formulación continua, donde la idea fundamental es que la variación de las características del tráfico en áreas cercanas es pequeña cuando se la compara a las diferencias del sistema entero, y de esta manera se pueden utilizar funciones continuas bidimensionales para representar las características de la red tales como el costo de viaje. El enfoque continuo tiene algunas ventajas en redes densas [8], ya que requiere menor cantidad de información. En principio puede aplicarse sin la necesidad de una construcción detallada del grafo de la red, utiliza menos recursos computacionales y, aun así, puede brindar una visión preliminar del impacto que se produce ante un cambio en la red. Existen diferentes estudios basados en este enfoque tanto para resolver problemas de asignación (elección de rutas por parte de los conductores), como problemas combinados de distribución-asignación (elección de ruta y destino posible por parte de los conductores) [9,10], teniendo en cuenta, además, la posibilidad de considerar múltiples clases de usuarios [11]. Una detallada reseña de la literatura y las posibilidades de aplicación se puede consultar en Ho y Wong [12]. Los autores del presente

artículo utilizaron el enfoque continuo para estudiar el impacto ambiental acústico [13] y atmosférico [14] que puede ser producido por un cambio morfológico en la red de transporte.

En todos los trabajos mencionados que usan la formulación continua el modelo es isótropo, es decir, asume que las características de las calles y las condiciones de circulación son independientes de la dirección considerada. Asimismo, hacen uso de funciones que expresan los tiempos de recorrido por unidad de longitud (si bien relacionadas con las características de las vías de circulación tales como la capacidad y la velocidad a flujo libre) sin detallar cómo pueden obtenerse experimentalmente. De hecho, no están explícitamente vinculadas a las funciones de tiempos de recorrido de arco usadas habitualmente en el enfoque clásico.

Una tercera cuestión no especificada en los modelos continuos publicados es cómo determinar el flujo y el tiempo de recorrido en cada calle a partir de los resultados obtenidos sobre el dominio espacial. Es decir, solo permiten la determinación de flujos promediados por zonas. Con el ánimo de aprovechar las ventajas del enfoque continuo, pero partiendo de las bien conocidas y aceptadas funciones de costo (tiempos de recorrido) en los arcos del enfoque clásico, en el presente trabajo se desarrolla un nuevo modelo que tiene en cuenta además las posibles características anisótropas de la red. Como se demuestra, la presente formulación conduce a un sistema de ecuaciones de difusión anisótropa no lineal que puede ser adecuadamente resuelto mediante el método de elementos finitos.

En la siguiente sección se presenta la formulación matemática del nuevo modelo continuo, y en el apartado 3 se comentan algunos aspectos de la resolución computacional. Posteriormente, en la sección 4 se analiza la efectividad del modelo propuesto mediante la comparación con resultados obtenidos a partir del enfoque discreto. Se presentan luego, en la sección 5, dos ejemplos en los cuales se aplica el modelo propuesto a una ciudad con zonas de distintas características, y finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones.

2. Modelo continuo anisótropo

2.1. Problema de equilibrio del usuario: formulación discreta

Se considera la ciudad como una región Ω delimitada por un borde exterior Γ_0 en la hora pico de la mañana cuando los viajes se generan en los hogares (distribuidos por toda la ciudad) y se dirigen hacia determinados puntos de destino.

La red de transporte se representa mediante un conjunto de nodos unidos por arcos dirigidos que representan en forma más o menos detallada las diferentes arterias urbanas. Los nodos corresponden a las intersecciones entre arterias, así como a los «centroides» de las zonas que actúan como orígenes o destinos de viajes.

El problema consiste en obtener las rutas seguidas por los usuarios desde sus puntos de origen hacia sus destinos, conociendo la cantidad de viajes por hora Q_{rs} entre tales pares origen-destino (originados en r con destino s), así como las características de la red de transporte. En otras palabras, la solución de tal problema permite determinar los flujos horarios en cada arco de la red.

Es importante mencionar que las características del tráfico durante el período de estudio se suponen constantes, es decir, se considera la situación estacionaria.

Para describir matemáticamente tal problema es necesario definir, en primer lugar, el tiempo de recorrido en cada arco como una función creciente del flujo existente en el mismo, es decir:

$$t_a = t_a(x_a) \quad (1)$$

donde x_a representa el flujo horario de vehículos (número de vehículos/hora) que recorre el arco a .

El carácter creciente de tal expresión refleja el efecto de la congestión. Por otra parte, para el caso de muy bajo flujo ($x_a = 0$), la expresión (1) adopta un valor definido que se denomina tiempo de recorrido a flujo libre, t_{a0} (este valor es obviamente igual al cociente entre la longitud del arco y la velocidad máxima sobre el mismo). Se trata de una expresión empírica cuya forma específica depende de las características del arco.

Para completar la formulación, se acepta que la elección de rutas por parte de los viajeros se realiza de acuerdo al ya enunciado primer principio de Wardrop [1]. Como han demostrado Beckmann et al. [2], este problema, denominado de equilibrio de usuario, puede ser formulado mediante un problema de optimización sujeto a restricciones.

Dicha formulación matemática se expresa de la siguiente manera:

$$\min z(x) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \quad \forall a \in A \quad (2a)$$

s.a.

$$\sum_k f_k^{rs} = Q_{rs} \quad \forall r, s \quad (2b)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (2c)$$

donde

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a \in A \quad (2d)$$

donde f_k^{rs} es el flujo entre el origen r y el destino s en la ruta k . La restricción (2b) expresa el principio de conservación de flujo y la restricción (2c) indica que el flujo en cada ruta entre r y s no puede ser negativo. La función $z(x)$ está definida sobre toda la red, mientras que la restricción de conservación de flujo está formulada sobre el conjunto de arcos consecutivos que forman las rutas entre origen y destino. Ambas se relacionan a través de (2d).

En correspondencia con este problema se puede formular un problema dual que maximiza una función objetivo ω que depende de una función potencial de costo u que representa el tiempo de viaje desde un determinado punto de la ciudad hasta el punto de destino s .

En consecuencia, el tiempo de recorrido, medido por los usuarios con destino s , correspondiente al arco a dirigido desde el nodo i hacia el nodo j , puede expresarse en la forma:

$$t_a = u_{js} - u_{is} \quad (3)$$

Luego, el problema dual equivalente a (2) puede ser expresado en la forma [8,15]:

$$\max \omega(u) = \sum_r \sum_s u_{rs} Q_{rs} - \sum_a \int_{t_{a0}}^{t_a} t_a^{-1}(z) dz \quad (4a)$$

s.a.

$$u_{js} + t_a \geq u_{is} \quad \forall i, j, s, a \quad (4b)$$

$$t_a \geq t_{a0} \quad \forall a \quad (4c)$$

donde t_a^{-1} es la inversa de la función de costo de viaje en el arco y los extremos de la integral t_a y t_{a0} representan el tiempo de recorrido y el tiempo de recorrido a flujo libre del arco a , respectivamente.

La restricción (4b) debe cumplirse para todo valor admisible de u_{is} aunque la relación de igualdad solo se verificará para la solución del problema, es decir, para los valores que minimicen (4a). La restricción (4c) sigue de la definición del tiempo de recorrido por arco (1).

Es importante mencionar una diferencia de la presente formulación dual en comparación con las presentadas por Sasaki et al. [8] y Robusté et al. [15]. En la referencia citada en primer término, el

problema variacional se plantea para una red distribuida en forma continua, mientras que en el trabajo de Robusté et al. [15], si bien también se plantea tal principio para la red de transporte representada en forma discreta (como un conjunto de arcos dirigidos y vinculados), se adoptan como variables de optimización a los tiempos de recorrido de arco t_a . Sin embargo, la utilización de la función potencial u_{is} como variable de optimización a través de la definición (3) facilita la formulación continua que se desarrolla en la sección siguiente.

Considerando la expresión (1) y especializando para un solo destino, el problema de optimización (4) puede ser reescrito en la forma:

$$\max \omega(u) = \sum_r u_r Q_r - \sum_a \int_{t_{a0}}^{t_a} x_a(z) dz \quad (5a)$$

s.a.

$$u_j + t_a \geq u_i \quad \forall i, j, a \quad (5b)$$

$$t_a \geq t_{a0} \quad \forall a \quad (5c)$$

Las formulaciones (2) y (4) para múltiples destinos —o la (5) para un solo destino— son válidas para diversas expresiones del tiempo de recorrido de arco t_a . En este trabajo se considera una de las funciones de tiempo de recorrido de arco más utilizadas, propuesta en el Manual de Asignación de Tráfico de la U.S. Bureau of Public Roads [16] y conocida como función BPR, que aquí se expresa de la siguiente manera:

$$t_a = t_{a0} \left(1 + \alpha_a \left((x_a + x_{Ra}) / C_a \right)^{\varphi_a} \right) \quad (6)$$

donde C_a representa la capacidad del arco, medida en vehículos por hora y por calle, y α_a y φ_a son coeficientes que tienen en cuenta las características específicas de la arteria considerada. La fórmula BPR relaciona el tiempo de recorrido con el flujo total sobre el arco. En la expresión (6) este último se considera como la superposición de 2 términos: uno describe el flujo de usuarios x_a que se comportan según el primer principio de Wardrop [1], mientras que el otro describe flujos residuales x_{Ra} que no cumplen tal principio. Este último término permite representar, por ejemplo, el flujo de vehículos de transporte público.

2.2. Modelo continuo para una ciudad monocéntrica

Se considera una ciudad con un solo centro que actúa como destino de todos los viajes producidos. Siguiendo el enfoque clásico, tal problema puede ser formulado mediante las expresiones (5) y (6).

Partiendo de tal planteamiento en forma discreta, se pretende obtener una formulación continua aproximadamente equivalente. Esto quiere decir que debe mantener las características del sistema y que una vez resuelto permita obtener el flujo vehicular y el tiempo de recorrido en cualquier calle de la red con valores similares a los obtenidos por medio del enfoque discreto.

Para ello, se divide el dominio completo de la ciudad Ω en M celdas de área $L_x L_y$, tal como se puede ver en la figura 1, donde las longitudes L_x y L_y son pequeñas con respecto a las dimensiones de la ciudad. Se supone que en el área que se examina existe un sistema de calles paralelas de tal manera que para cada calle en una dirección y sentido, existe otra en igual dirección y sentido contrario.

De esta manera, los arcos que se suman en la expresión (5a) corresponden a la mitad de los arcos y las longitudes l_a de los tramos a tener en cuenta serán las distancias entre 2 calles de igual dirección y sentido. Se considera que el sentido de circulación en el arco a , en la dirección s , que forma un ángulo γ_a con el eje x , es desde el nodo i hacia el nodo j de acuerdo a la figura 2.

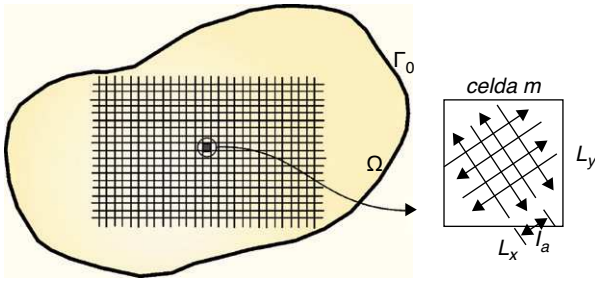


Figura 1. Discretización de la ciudad y sistema de calles en las celdas.

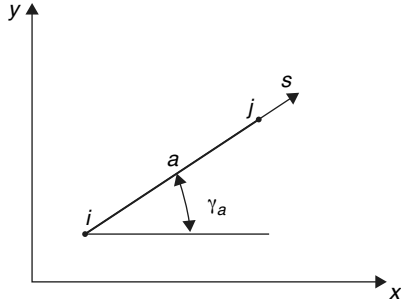


Figura 2. Tramo de calle entre nodos. Dirección y sentido de circulación.

El tiempo mínimo de recorrido del arco se puede expresar de acuerdo a (3), y esta diferencia de potencial entre los 2 nodos del arco puede aproximarse de la siguiente manera:

$$\Delta u \simeq -\frac{\partial u}{\partial s} l_a \quad (7)$$

Teniendo en cuenta que:

$$\frac{\partial u}{\partial s} = \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial s} = \frac{\partial u}{\partial x} \cos \gamma + \frac{\partial u}{\partial y} \sin \gamma, \quad (8)$$

el tiempo de recorrido del arco puede ser escrito en la forma:

$$t_a = -l_a \left(\frac{\partial u}{\partial x} \cos \gamma + \frac{\partial u}{\partial y} \sin \gamma \right) \quad (9)$$

En las expresiones (7)-(9) se asume implícitamente que u puede representarse como una función continua bidimensional que adopta los valores adecuados en cada uno de los nodos a los cuales se los identifica por sus coordenadas cartesianas (x, y) . En consecuencia, $u(x, y)$ representa el tiempo de viaje desde el nodo ubicado en (x, y) hasta el centro (destino).

Aplicando ahora el cálculo variacional sobre la formulación (5a), se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \delta \omega &= \sum_r \delta u_r Q_r - \sum_m \sum_{a \in m} \delta \int_{t_{a0}}^{t_a} x_a(z) dz \\ &= \sum_r \delta u_r Q_r - \sum_m \sum_{a \in m} x_a(t_a) \delta t_a \quad m = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (10)$$

donde a denota cada arco (en uno de los 2 posibles sentidos) perteneciente a cada celda m . Por otra parte, invirtiendo la expresión (6), se obtiene:

$$x_a(t_a) = \left(\frac{t_a - t_{a0}}{\alpha_a t_{a0}} C_a^{\varphi_a} \right)^{\frac{1}{\varphi_a}} - x_{Ra} \quad (11)$$

Multiplicando y dividiendo el segundo término de (10) por t_a , empleando la notación $p_a = \frac{x_a(t_a)}{t_a}$, $u_x = \frac{\partial u}{\partial x}$, $u_y = \frac{\partial u}{\partial y}$, y teniendo en

cuenta que $\delta t_a = \left(\frac{\partial t_a}{\partial u_x} \delta u_x + \frac{\partial t_a}{\partial u_y} \delta u_y \right)$, se llega a la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \delta \omega &= \sum_r \delta u_r Q_r - \sum_m \sum_{a \in m} p_a \left(-l_a (u_x \cos \gamma_a + u_y \sin \gamma_a) \right) \\ &\quad \times (-l_a \cos \gamma_a \delta u_x - l_a \sin \gamma_a \delta u_y) \end{aligned} \quad (12)$$

Y entonces:

$$\begin{aligned} \delta \omega &= \sum_r \delta u_r Q_r - \sum_m \sum_{a \in m} p_a l_a^2 \cos^2 \gamma_a u_x \delta u_x + p_a l_a^2 \cos \gamma_a \sin \gamma_a u_x \delta u_y \\ &\quad + p_a l_a^2 \sin \gamma_a \cos \gamma_a u_y \delta u_x + p_a l_a^2 \sin^2 \gamma_a u_y \delta u_y \end{aligned} \quad (13)$$

Multiplicando y dividiendo por el área $L_x L_y$ y reagrupando se llega a:

$$\begin{aligned} \delta \omega &= \sum_r \delta u_r Q_r - \sum_m (k_x u_x \delta u_x + k_{xy} u_x \delta u_y + k_{xy} u_y \delta u_x \\ &\quad + k_y u_y \delta u_y) L_x L_y \end{aligned} \quad (14)$$

donde:

$$k_x = \sum_{a \in m} p_a(t_a) \frac{l_a^2 \cos^2 \gamma_a}{L_x L_y} \quad (15a)$$

$$k_y = \sum_{a \in m} p_a(t_a) \frac{l_a^2 \sin^2 \gamma_a}{L_x L_y} \quad (15b)$$

$$k_{xy} = \sum_{a \in m} p_a(t_a) \frac{l_a^2 \cos \gamma_a \sin \gamma_a}{L_x L_y} \quad (15c)$$

Las expresiones (12)-(15) llevan implícita la suposición de que para cada celda, las derivadas parciales de u no varían. Esta es una hipótesis muy razonable si se considera que las dimensiones de la celda son muy pequeñas frente a las distancias características de toda la ciudad. Con tal idea se toma a continuación el límite de la expresión (15), cuando el área $L_x L_y$ tiende a un diferencial de área $d\Omega$, asumiendo la demanda de viajes distribuida continuamente en el área: q (número de viajes por unidad de área).

En consecuencia, se obtiene:

$$\begin{aligned} \delta \omega &= \int_{\Omega} \delta u q d\Omega - \int_{\Omega} (k_x u_x \delta u_x + k_{xy} u_x \delta u_y + k_{xy} u_y \delta u_x \\ &\quad + k_y u_y \delta u_y) d\Omega \end{aligned} \quad (16)$$

Integrando por partes el segundo término de (16) se llega a:

$$\begin{aligned} \delta \omega &= \int_{\Omega} \left(q \delta u + \frac{\partial (k_x u_x)}{\partial x} \delta u + \frac{\partial (k_{xy} u_x)}{\partial y} \delta u + \frac{\partial (k_{xy} u_y)}{\partial x} \delta u + \frac{\partial (k_y u_y)}{\partial y} \delta u \right) d\Omega \\ &\quad - \oint_{\Gamma_0} (n_x k_x u_x \delta u + n_x k_{xy} u_y \delta u + n_x k_{xy} u_x \delta u + n_y k_y u_y \delta u) d\Gamma_0 \end{aligned} \quad (17)$$

En un punto estacionario debe ser $\delta \omega = 0$, y por lo tanto, como δu es arbitraria, se deben cumplir las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} + k_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{xy} \frac{\partial u}{\partial x} + k_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + q &= 0 \\ \forall (x, y) \in \Omega \end{aligned} \quad (18)$$

y

$$f_x n_x + f_y n_y = 0, \forall (x, y) \in \Gamma_0 \quad (19)$$

donde

$$\begin{aligned} f_x &= - \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} + k_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ f_y &= - \left(k_{xy} \frac{\partial u}{\partial x} + k_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

mientras que $n_x n_y$ son las componentes del versor normal a la curva que define el contorno de la ciudad.

Las ecuaciones (18) y (19) así determinadas corresponden a las ecuaciones de Euler del funcional (17). Considerando la interpretación de $q(x,y)$, es claro que, con las definiciones de densidad de flujo de tráfico $\bar{f} = (f_x, f_y)$ dadas por (20), la expresión (18) corresponde a una ecuación de continuidad de vehículos por hora.

Otras condiciones de contorno posibles son las siguientes:

a) valor nulo de u en el centro de destino (por definición del potencial u):

$$u(x_c, y_c) = 0 \quad (21)$$

donde (x_c, y_c) son las coordenadas del centro de destino.

b) flujo conocido f_{n0} en algún borde interno o externo:

$$f_x n_x + f_y n_y = f_{n0} \quad (22)$$

La ecuación gobernante (18) con sus correspondientes condiciones de borde (19), (20) o (21) constituye el modelo continuo aquí propuesto para una ciudad monocéntrica. Es decir, el problema se reduce a uno gobernado por ecuaciones diferenciales a derivadas parciales no lineales del tipo difusión.

Es interesante notar que los coeficientes de «difusión» (15) son simétricos con respecto al sentido de circulación en cada una de los arcos (valen lo mismo para γ o para $-\gamma$); por lo tanto, el sentido de circulación viene determinado por el gradiente de u de acuerdo a (20).

Debe observarse que, una vez resuelto el problema no lineal para $u(x,y)$ —el tiempo de recorrido desde la posición ubicada en (x,y) hasta el centro en el estado de equilibrio de usuario—, es posible determinar a través de (9) y (11) los tiempos de recorrido y el correspondiente flujo horario (es decir, el grado de congestión) para cada arteria.

Entonces pueden ser recuperadas las variables de la representación discreta. Este es un hecho novedoso, como se discutirá en la sección 2.4. También debe notarse que este modelo es muy general en cuanto a la configuración de la red. Esta viene dada por los valores de los coeficientes de difusión definidos en (15).

Como se observa, puede admitir arcos no paralelos a los ejes de referencia x y y , y diferentes características para cada dirección. Se trata de un modelo que considera la posible anisotropía de la configuración de la red de transporte.

2.3. Extensión del modelo continuo anisótropo para una ciudad policéntrica (destinos múltiples) y con demanda variable

Se puede generalizar el razonamiento anterior para contemplar múltiples destinos y una demanda variable. En este caso, la densidad de viajes generados hacia el centro s en el punto (x,y) se designa como $q_s(x, y)$, el flujo horario en el arco a con destino s es x_a^s , y el tiempo de recorrido mínimo entre el punto (x,y) y el centro s viene dado por $u_s(x, y)$. En general, la demanda de viajes es de naturaleza elástica con respecto al tiempo mínimo de viaje, fundamentalmente cuando el tráfico está congestionado. Ante el aumento del tiempo de viaje, es probable que algunos usuarios decidan no viajar en el horario considerado o utilizar otro medio de transporte. Se asume entonces que $q_s(x, y) = D_s(u_s(x, y), x, y)$, donde $D_s(u_s(x, y), x, y)$ es una función decreciente capaz de reflejar el comportamiento elástico de la demanda.

El tiempo de recorrido en cada arco depende del flujo total sobre el mismo, es decir, que puede ser expresado de acuerdo a (6) en la forma:

$$t_a = t_{a0} \left(1 + \frac{\alpha_a}{C_a^{\varphi_a}} \left(\sum_i x_a^i + x_{Ra} \right)^{\varphi_a} \right) \quad (23)$$

Esta expresión puede ser re-escrita de la siguiente manera:

$$t_a = t_{a0} \left(1 + \frac{\alpha_a}{C_a^{\varphi_a}} \left(x_a^s + \left(\sum_{i \neq s} x_a^i + x_{Ra} \right) \right)^{\varphi_a} \right) \quad (24)$$

Comparando esta última expresión con (6) puede observarse que es posible interpretar esta última como el tiempo de recorrido de arco de los vehículos que se dirigen hacia el centro s , coexistiendo en tal arco un flujo «residual» $\left(\sum_{i \neq s} x_a^i + x_{Ra} \right)$ que no respeta

la elección de tiempo mínimo hacia el centro s . Con tal interpretación, el problema queda formulado para los vehículos que se dirigen hacia el centro s , de una forma análoga al caso monocéntrico. Luego, a partir de (24) puede obtenerse la expresión para el flujo horario en el arco a , dirigiéndose al destino s en la forma:

$$x_a^s = \left(\frac{t_a^s - t_{a0}}{t_{a0}} \frac{C_a^{\varphi_a}}{\alpha_a} \right)^{\frac{1}{\varphi_a}} - \left(\sum_{i \neq s} x_a^i + x_{Ra} \right) \quad (25)$$

donde t_a^s es el tiempo de recorrido sobre el arco a de los vehículos dirigiéndose al centro s . De acuerdo a (9), su valor mínimo puede ser expresado en la forma:

$$t_a^s = -l_a \left(\frac{\partial u_s}{\partial x} \cos \gamma_a + \frac{\partial u_s}{\partial y} \sin \gamma_a \right) \quad (26)$$

Luego, siguiendo los mismos pasos desarrollados en la sección 2.2 para un destino genérico s , se obtiene el siguiente sistema de M ecuaciones diferenciales no lineales acopladas que rige el problema considerado:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x^s \frac{\partial u_s}{\partial x} + k_{xy}^s \frac{\partial u_s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{xy}^s \frac{\partial u_s}{\partial x} + k_y^s \frac{\partial u_s}{\partial y} \right) + q_s &= 0 \\ \forall (x, y) \in \Omega, s = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (27)$$

donde:

$$k_x^s = \sum_{a \in m} p_a^s(t_a^s) \frac{l_a^2 \cos^2 \gamma_a}{L_x L_y} \quad (28a)$$

$$k_{xy}^s = \sum_{a \in m} p_a^s(t_a^s) \frac{l_a^2 \cos \gamma_a \sin \gamma_a}{L_x L_y} \quad (28b)$$

$$k_y^s = \sum_{a \in m} p_a^s(t_a^s) \frac{l_a^2 \sin^2 \gamma_a}{L_x L_y} \quad (28c)$$

$$p_a^s = \frac{x_a^s}{t_a^s} \quad (28d)$$

En esta última expresión, x_a^s y t_a^s vienen dadas por (25) y (26). Obviamente una vez resuelto el problema se verifica que:

$$t_a = t_a^s \quad \forall s \quad (29)$$

El modelo continuo presentado corresponde al denominado problema de asignación de viajes de acuerdo al principio de equilibrio del usuario. El modelo puede ser directamente extendido a otros problemas (distintas clases de usuarios, elección de modos

de transporte, etc.). Por ejemplo, es muy simple considerar el problema de distribución-asignación. En este problema se conoce la demanda de viajes que se genera en la ciudad con diversos destinos posibles y cuya elección será determinada por el que implique el mínimo tiempo de viaje. Esto puede corresponder a los viajes generados para alcanzar instalaciones de atracción tales como, por ejemplo, diversos centros comerciales que compiten por la captura de clientes.

Este tipo de problema puede formularse mediante la ecuación gobernante (18) con la condición de borde (19) en la periferia de la ciudad y expresiones de la forma (21) para cada centro de atracción. Por otra parte, si existieran diferentes clases de usuarios usando la red, el problema de asignación debería formularse a partir del sistema (27) —donde q_s corresponde a la densidad de viajes generados en un punto (x,y) de la clase s —. Otras generalizaciones quedan fuera del alcance del presente trabajo.

2.4. Diferencia de la presente teoría con respecto a la formulación de Sasaki, Iida y Yang

La formulación continua de Sasaki, Iida y Yang [8] (SIY) constituyó una contribución muy importante que permite la aplicación de técnicas computacionales de gran desarrollo tales como el método de elementos finitos al problema de asignación de tráfico. A su vez, este modelo fue extendido para considerar problemas de mayor complejidad, tales como la existencia de demanda variable, problemas multicéntricos con diferentes clases de usuarios, modelos combinados discretos-continuos (en los que se utilizó el enfoque discreto para la consideración de autopistas y la continua para flujo en calles) [17], desarrollo de modelos para el análisis del impacto ambiental del tráfico [13,14], etc.

La principal diferencia entre el modelo de SIY y el aquí presentado está en la manera de considerar los tiempos de recorrido en función de los flujos de tráfico. En aquel, tal definición se hace directamente para una formulación continua. Así se introduce el tiempo de recorrido por unidad de distancia sobre el continuo: $c(x,y)$. Esta magnitud se hace dependiente de la intensidad del flujo de tráfico continuo (20): f_x, f_y . La forma básica utilizada de acuerdo a tal hipótesis es la siguiente:

$$c(x,y) = \alpha(x,y) + \beta(x,y) \left| \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \right|^\gamma \quad (30)$$

Las funciones α, β y γ dependen de parámetros específicos mediados de la red en un entorno del punto (x,y) . Así, α es la inversa de la velocidad a flujo libre media, mientras que β depende de una definida densidad de capacidad de tráfico y de otras funciones no explícitas que a su vez, al igual que γ , pueden depender de características particulares tales como anchos de calle, características de la semaforización, etc.

Estas últimas funciones deben obtenerse empíricamente efectuando mediciones y observaciones para diferentes zonas de una ciudad, aunque no se indica taxativamente cómo realizar tales tareas. Esto representa un claro inconveniente.

Otro problema es que el tiempo por unidad de longitud c debe ser un escalar, estando adecuadamente definido en términos del módulo del flujo continuo en la expresión (30). Sin embargo, esta expresión indica que el tiempo de recorrido no depende de la dirección. Es decir, se trata de una función isotrópica. Este no es necesariamente el caso en ciudades reales en las cuales pueden existir diferencias de características de calles en distintas direcciones. En la teoría de SIY no se indica modo alguno de considerar tal anisotropía.

Por otra parte, el modelo de SIY se desarrolla siguiendo las ideas presentadas en la sección 2.1, aunque trabajando directamente con la formulación continua. Entonces no queda clara la correspondencia con la estructura discreta del problema y, de hecho, no pueden

recuperarse las variables discretas: flujos horarios en cada arco ni tiempos de recorrido. Por lo tanto, se propone la utilización de tal enfoque tan solo como un método rápido, muy conveniente para visualizar las características generales en las etapas previas de diseño, aunque para cálculos más detallados habría que recurrir al método clásico (1) y (2).

La presente formulación mejora el modelo de SIY, ya que supera varios de los inconvenientes citados. La función de tiempo de recorrido básica (1) es exactamente la misma que se utiliza en el enfoque clásico, y entonces queda perfectamente definida a partir de los métodos experimentales usuales. Por otra parte, la forma que se da a tal función de acuerdo a la expresión (6) hace posible la consideración simultánea de flujos de arco que no siguen la primera ley de Wardrop (hecho de utilidad para incorporar el transporte público).

La presente formulación se deduce directamente del caso discreto como un paso al límite, y entonces la ecuación gobernante considera adecuadamente la estructura discreta en los coeficientes de difusión (28), pudiendo acomodar en forma natural características anisótropas de la red. La directa relación entre las formulaciones discreta y continua permite recuperar las variables discretas en cada arco, una vez resueltas las ecuaciones diferenciales gobernantes, mediante las expresiones (25) y (26).

Tales mejoras podrían implicar la posibilidad de usar esta metodología con una precisión similar al enfoque discreto aunque, al igual que con la teoría de SIY, con una carga computacional mucho menor, al menos para redes muy densas. Pero justamente tal es el caso en la modelización de redes urbanas modernas. Aun así, para estudios preliminares también puede utilizarse fácilmente para obtener patrones generales, como en el enfoque de SIY.

3. Solución computacional mediante el método de elementos finitos

El sistema gobernante de ecuaciones diferenciales (27) con sus correspondientes condiciones de contorno puede ser resuelto por varios enfoques numéricos apropiados. En este trabajo se hace uso del método de elementos finitos a través del software comercial FlexPDE [18].

En tal programa el problema se define a través de la escritura de las ecuaciones diferenciales gobernantes y de sus correspondientes condiciones de contorno en un archivo de textos denominado descriptor utilizando una notación muy sencilla, similar a la usada comúnmente en matemática.

Internamente, dicho programa se encarga de obtener las correspondientes ecuaciones variacionales, a través de un proceso tipo Galerkin, así como de la correspondiente discretización efectuando un mallaado automático. Además posee varias estrategias que el usuario puede seleccionar para la resolución de problemas no lineales de contorno y/o de valores iniciales.

Entonces el descriptor para el presente problema deberá contener las definiciones de las características de la red tales como velocidad de circulación, capacidad de las calles, orientación, etc., y las expresiones de los coeficientes de difusión (28).

A partir de estos datos puede implementarse la ecuación (27). Asimismo debe definirse la geometría, las correspondientes condiciones de borde, y las particularidades del post-proceso deseado.

Por otra parte, deben seleccionarse las alternativas algorítmicas adecuadas. En este trabajo se resuelven inicialmente las correspondientes ecuaciones para valores constantes de los coeficientes de difusión, asumiendo congestión despreciable. A partir de esta solución inicial, el problema se resuelve aplicando el método de Newton-Raphson en el caso de un solo centro. En el caso de 2 o más centros, se implementa un procedimiento iterativo en el cual se trabaja sobre un centro y se mantienen constantes los valores

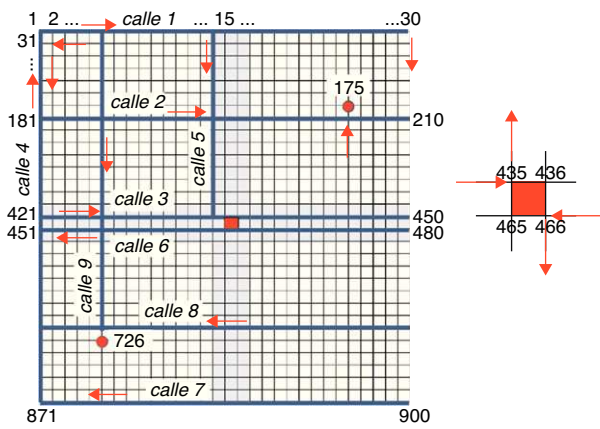


Figura 3. Esquema de calles y numeraci3n de nodos de la red discreta.

de los flujos correspondientes a los otros centros, altern3ndose el centro activo cada vez.

4. Validaci3n del modelo

Para validar el modelo propuesto se analiza un dominio espacial de $2,9 \times 2,9 \text{ km}^2$ que se modela como una superficie delimitada por un borde externo en el caso continuo y como una red de arcos y nodos en el modelo discreto tradicional. En este caso, la red se compone de 900 nodos y 1.740 enlaces de 100 m de longitud cada uno, formando calles perpendiculares entre s3 con un solo sentido de circulaci3n, tal como se puede ver en la figura 3. Sobre esta red se consideran 4 situaciones diferentes:

- Modelo isot3ropo con un 3nico destino.** Todos los viajes que se generan en la ciudad se dirigen al centro (que corresponde a los 4 nodos centrales de la fig. 3) y las caracter3sticas de las calles son iguales en las 2 direcciones y sentidos. La demanda es $q = 750 \text{ veh/h/km}^2$ (para la formulaci3n discreta a cada nodo le corresponde una demanda de 6.308 viajes dividido por el n3mero de nodos), con los siguientes par3metros que permiten definir el tiempo de recorrido por arco de acuerdo a (6): velocidad m3xima de circulaci3n: 60 km/h , capacidad de las calles: $C = 600 \text{ veh/h}$, $\alpha = 0,15$, $\varphi = 2$, y $x_R = 0$.
- Modelo ort3tropo con un 3nico destino.** Todos los viajes que se generan en la ciudad se dirigen a un 3nico centro (correspondiendo a los 4 nodos centrales de la fig. 3), pero las calles tienen diferentes caracter3sticas de acuerdo a la direcci3n. Demanda $q = 750 \text{ veh/h/km}^2$ (para la formulaci3n discreta a cada nodo le corresponde una demanda de 6.308 viajes dividido por el n3mero de nodos). Los par3metros de la f3rmula BPR son $\varphi = 1$, $\alpha = 0,15$, $x_R = 0$, $C = 600 \text{ veh/h}$ y velocidad m3xima de circulaci3n, 60 km/h en todas las calles salvo en las 2 zonas de avenidas, sombreadas en la figura 3, donde la velocidad de circulaci3n es mayor, 70 km/h , en el sentido de ingreso/egreso al centro de la ciudad.
- Modelo isot3ropo multidesestino con demanda fija.** Los viajes que se generan en la ciudad se dirigen a 2 centros diferentes. Demanda hacia el centro 1 (nodo 175 de la fig. 3) $q_1 = 375 \text{ veh/h/km}^2$, demanda hacia el centro 2 (nodo 726 de la fig. 3) $q_2 = 375 \text{ veh/h/km}^2$ (para la formulaci3n discreta a cada nodo le corresponde una demanda de $6.308/2$ viajes dividido por el n3mero de nodos), $C = 600 \text{ veh/h}$, $\alpha = 0,15$, $\varphi = 2$, $x_R = 0$.
- Modelo isot3ropo multidesestino con demanda variable.** En este caso la demanda que se genera hacia cada centro depende del tiempo de viaje, de la demanda potencial y de un par3metro ζ que refleja la naturaleza el3stica de dicha demanda. Hacia los centros 1 y 2

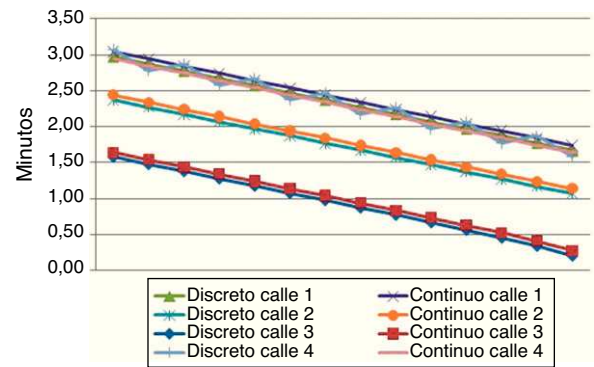


Figura 4. Tiempo de viaje desde cada nodo de las calles 1 a 4 hasta el centro (caso a).

$q_1 = 375e^{-\zeta u_1}$ y $q_2 = 375e^{-\zeta u_2}$, respectivamente, con $\zeta = 0,5$. El resto de las caracter3sticas se mantienen iguales a las del caso anterior.

El an3lisis de tales problemas de asignaci3n siguiendo el enfoque discreto corresponde a resolver el problema de optimizaci3n (2), para lo cual se aplica el cl3sico m3todo de Frank-Wolfe [19]. Los detalles sobre tal enfoque pueden consultarse en el trabajo anterior de los autores, ya mencionado [7].

En esta secci3n se comparan los resultados obtenidos con el enfoque discreto y los obtenidos con el nuevo modelo propuesto en los 4 casos diferentes definidos. Para la formulaci3n del modelo continuo se adoptan celdas de 2×2 cuadras (considerando para cada direcci3n 2 calles en sentidos opuestos).

Es importante mencionar que los casos considerados est3n muy idealizados, ya que (para el enfoque discreto) se supone que se cuenta con informaci3n suficientemente precisa sobre la generaci3n de viajes en cada esquina. Por otra parte, los centros de destino se suponen adecuadamente representados por una regi3n muy peque1a (uno a 4 nodos), es decir, de un tama1o de no m3s que 4 manzanas. Se trata de una zona urbana muy peque1a en general para formular un problema de asignaci3n real. Sin embargo, tales ejemplos resultan muy 3tiles para analizar la precisi3n del presente modelo continuo con respecto al cl3sico enfoque discreto. Esto es as3 ya que, para redes m3s densas, el m3todo continuo tender3 a dar a3n mejores resultados (se cumplen mejor las hip3tesis del modelo).

Para los casos a) y b), la soluci3n con el modelo continuo requiere unos pocos segundos (se modela un cuarto del dominio, aprovechando la simetr3a del modelo). La soluci3n del caso c) se alcanza en algo menos de 1 min corriendo 5 iteraciones para cada centro, y la del caso d) en 2,5 min para igual cantidad de iteraciones.

Por otra parte, el modelo discreto requiere mucho m3s tiempo. Para el caso c) la soluci3n se alcanza en casi 4 h de c3lculo.

Es de inter3s mencionar que, en general, la discretizaci3n necesaria realizada por el m3todo de elementos finitos depender3 de detalles de heterogeneidad de las caracter3sticas urbanas y en general de la existencia o no de variaciones bruscas de la funci3n potencial u . Es decir, tal discretizaci3n es independiente de la estructura discreta real de la red. As3, la cantidad de nodos en general no precisa aumentar de forma importante con el tama1o de la ciudad.

En cambio, la formulaci3n discreta s3 aumenta en general con el tama1o de la ciudad (cantidad de arcos), increment3ndose de la misma manera el tiempo de c3lculo.

En las figuras 4–6 se muestran los resultados obtenidos para el caso a). En la figura 4 se puede ver el tiempo total de recorrido desde cada nodo hasta el centro (nodo 435) para las calles de la zona noroeste, es decir, calle 1 (nodos 1 a 14), calle 2 (nodos 181 a 194), calle 3 (nodos 421 a 434) y calle 4 (nodos 1 a 421). La diferencia

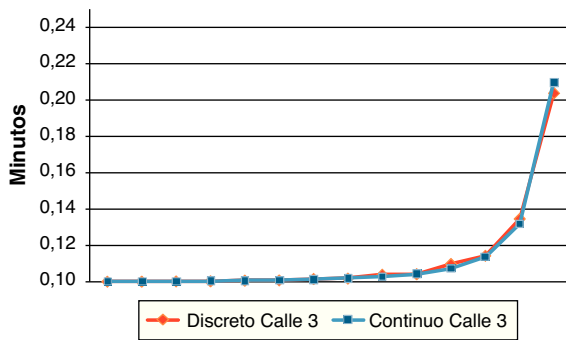


Figura 5. Tiempo de recorrido de cada tramo en la calle 3 (caso a).

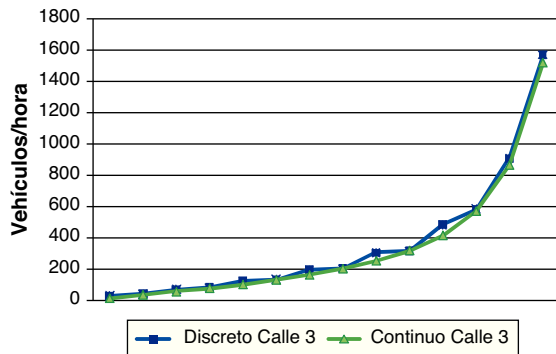


Figura 6. Flujo de vehículos en cada tramo de la calle 3 (caso a).

promedio entre los resultados obtenidos por ambos métodos es menor al 5%.

En la figura 5 se muestra el tiempo de recorrido en minutos, de cada tramo (en este caso cada cuadra) para la calle 3 de la misma zona descrita en el gráfico anterior. Como se puede advertir, los resultados por ambos enfoques son prácticamente coincidentes. Lo mismo ocurre efectuando comparaciones para otras calles (no mostradas aquí).

En la figura 6 se muestra el flujo de vehículos en una arteria congestionada (calle 3). Como se aprecia, los flujos horarios obtenidos por ambos enfoques tienen muy buena concordancia, y la diferencia promedio de los 3 arcos más comprometidos es del orden del 3%.

En las figuras 7-10 se pueden ver los resultados obtenidos en el análisis del caso b), donde existen avenidas en las cuales la velocidad de circulación es mayor en la dirección de ingreso/egreso al centro. En la calle 3 (O-E), por ejemplo, la velocidad de circulación a flujo libre es de 70 km/h, mientras que en las calles transversales

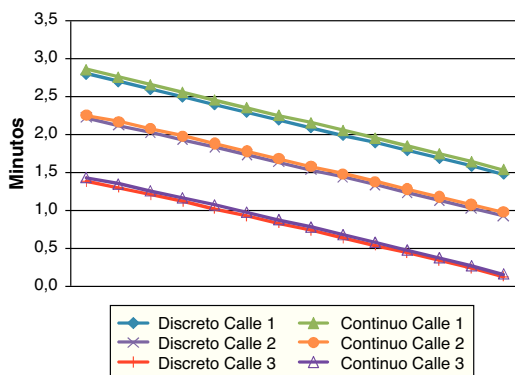


Figura 7. Tiempo de viaje desde cada nodo de las calles 1 a 3 hasta el centro (caso b).

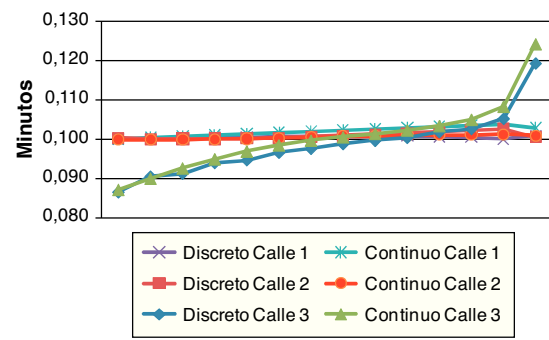


Figura 8. Tiempo de recorrido de los arcos de las calles 1 a 3 (caso b).

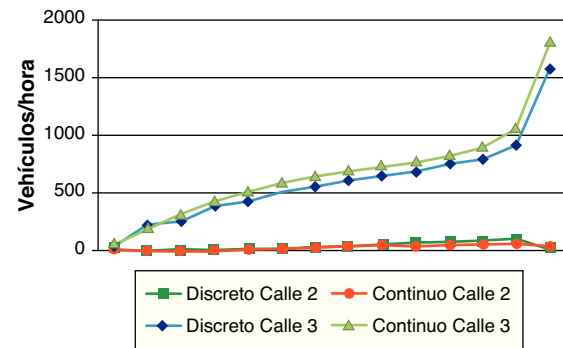


Figura 9. Flujo de vehículos en las calles 2 y 3.

(N-S, S-N) es de 60 km/h. De la misma manera, en la calle 5 (N-S) la velocidad máxima es 70 km/h y en las calles perpendiculares (E-O, O-E), de 60 km/h. En la figura 7 se puede ver el tiempo total de viaje desde cada nodo hasta el centro para las calles 1, 2 y 3, en el cuadrante noroeste de la ciudad. La diferencia promedio entre los resultados obtenidos por ambos métodos es menor al 5%.

En la figura 8 se puede apreciar el tiempo de recorrido de los arcos correspondientes a las calles 1, 2 y 3 de la zona noroeste. En la calle 3, al ser mayor la velocidad de circulación, disminuye el tiempo de recorrido (que en la zona más congestionada no alcanza a la mitad del tiempo del caso a). La correspondencia entre los valores obtenidos con el enfoque discreto y el continuo es muy buena, con una diferencia promedio menor al 0,6% y una diferencia máxima menor a 1 s. En la figura 9 se compara el flujo de vehículos obtenido por ambos métodos. Se aprecia que el modelo continuo sobreestima el valor del flujo en aproximadamente el 10%.

En la figura 10 se muestran los tiempos de viaje, a manera de ejemplo, desde cada nodo de la calle indicada hasta los puntos de destino para el caso c). Se puede apreciar claramente la buena

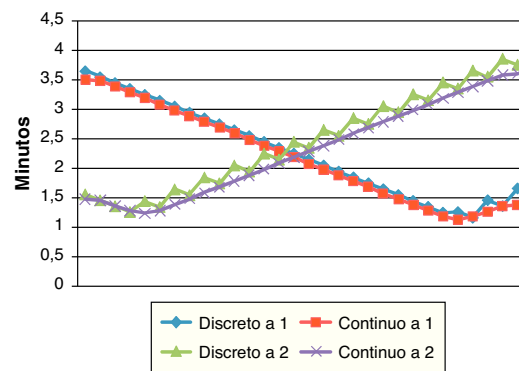


Figura 10. Tiempo de viaje en la calle 3 hasta los centros 1 y 2 (caso b).

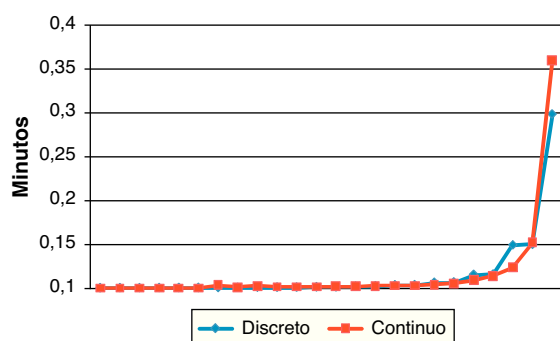


Figura 11. Tiempo de recorrido de tramos de la calle 9 (caso c).

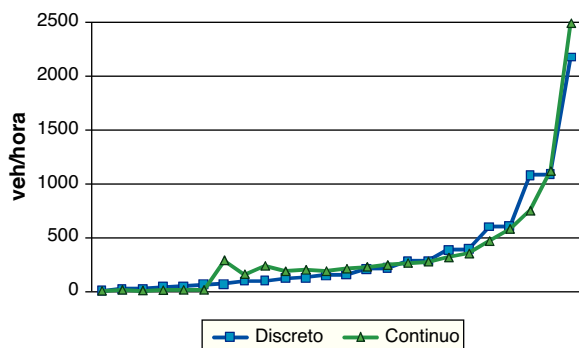


Figura 12. Flujos en arcos de la calle 9 (caso c).

correspondencia que existe entre los valores obtenidos por ambos enfoques. Lo mismo ocurre para nodos sobre otras arterias.

Por otra parte, en las figuras 11 y 12 se aprecian comparaciones para los tiempos de recorrido de arcos y flujos horarios, respectivamente, para la calle 9, siendo muy buena la concordancia entre ambos enfoques.

Finalmente, en las figuras 13–15 se compara la demanda de viajes generada en puntos de la diagonal SO-NE hacia el destino 1 y los tiempos de viaje y los flujos correspondientes en los arcos de la calle 9 para el caso d).

Como se ha mostrado en estas comparaciones, la concordancia entre el presente modelo continuo y el discreto es excelente. Los errores máximos son insignificantes considerando la incertidumbre de los datos en aplicación a casos reales (valores precisos de la densidad de generación de viajes, definición geométrica adecuada de centros de destino, etc.). Asimismo es importante notar que la concordancia será aún mejor para redes densas correspondientes a grandes centros urbanos, en las cuales la definición de cada celda puede incorporar varias calles (5 o 6 cuadras al cuadrado), ya que en

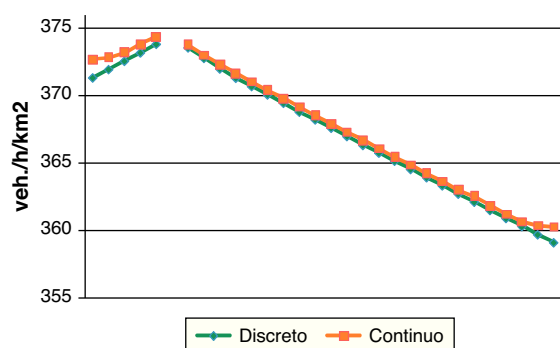


Figura 13. Demanda en puntos de la diagonal SO-NE (caso d).

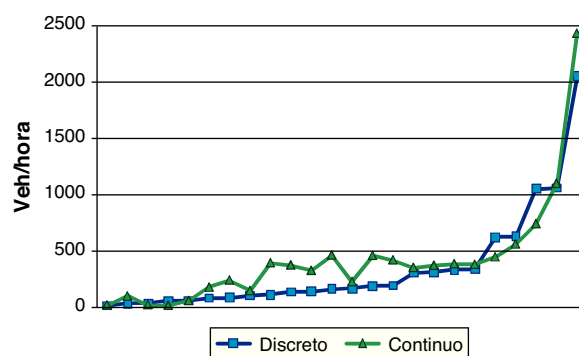


Figura 14. Flujos en arcos de la calle 9 (caso d).

este caso se verificarían mejor las hipótesis consideradas. Además, la principal motivación es justamente el análisis del tráfico urbano en grandes redes.

5. Ejemplos de aplicación

Se presentan a continuación 2 ejemplos más realistas donde se aplican los modelos presentados para uno y varios destinos con demanda fija y variable.

5.1. Un punto de destino. Competencia de instalaciones

En el primer caso, se aplica el modelo continuo al estudio del comportamiento de la red de tráfico en una ciudad de aproximadamente $35 \times 25 \text{ km}^2$ donde 4 establecimientos compiten entre sí por la captura de clientes. Estas instalaciones pueden ser centros comerciales, plantas industriales, establecimientos educativos o estaciones de servicio, entre otras. En este caso, la demanda que se genera en cada punto de la ciudad se dirige a un solo destino, que se selecciona según el criterio de mínimo tiempo de viaje. En la ciudad se distinguen 3 zonas con diferentes características en cuanto a demanda de viajes, configuración de las calles y velocidad de circulación máxima, que se muestran en la tabla 1.

Las zonas y los centros se muestran en la figura 16, donde se puede apreciar también la malla de elementos finitos utilizada.

En la figura 17 se puede ver el mapa de tiempo de viaje, en horas, desde cada punto de la ciudad hasta el destino seleccionado. Se puede observar cómo las curvas se estiran en la dirección de velocidad mayor a flujo libre, 0° , 135° y 30° en las zonas 1, 2 y 3, respectivamente.

En la figura 18, donde se muestra el patrón de flujo vehicular en vehículos/hora/km, se puede apreciar la atracción que los centros ejercen en los usuarios para elección de rutas. De la totalidad de los viajes generados en toda la ciudad, 90.410 usuarios eligen el

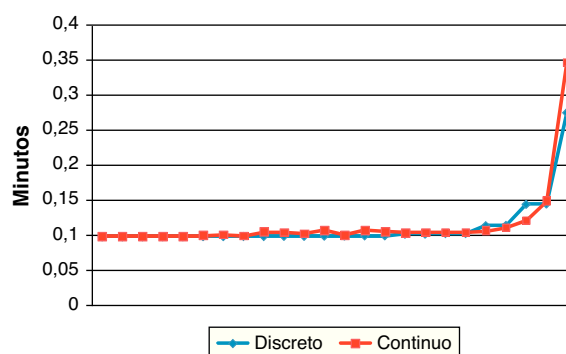


Figura 15. Tiempo de recorrido de arcos de la calle 9 (caso d).

Tabla 1 Características de las calles y demanda de las zonas de estudio

Zona	γ_1 (grados)	γ_2 (grados)	V_{m1} (km/h)	V_{m2} (km/h)	φ	α	q (veh/h/km ²)
1	0	90	70	40	2	0,15	750
2	45	135	40	60	2	0,15	350
3	30	120	60	40	2	0,15	500

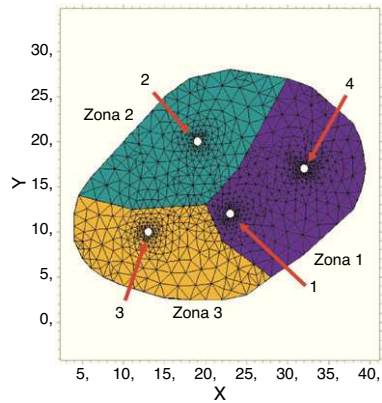


Figura 16. Zonas y centros de la ciudad.

destino 1, 63.784 el 2, 79.602 el 3 y 110.478 el destino 4. Los 2 destinos más solicitados están directamente relacionados con las condiciones de demanda, y la preferencia por el centro 1 está influenciada por la velocidad máxima permitida y la ubicación con respecto a los otros centros.

5.2. Dos puntos de destino con demanda variable

En el ejemplo que se presenta a continuación se modela la misma ciudad con las mismas características zonales, pero en este caso existen 2 puntos diferentes de destino (2 y 4) y la demanda de viajes hacia cada uno de ellos es variable. En la zona 1 la demanda en veh/h/km² se calcula con las expresiones $q_2 = 200 e^{-0,5u_2}$, $q_4 = 375 e^{-0,5u_4}$; en la zona 2 mediante $q_2 = 200 e^{-0,5u_2}$, $q_4 = 350 e^{-0,5u_4}$, y en la zona 3 de acuerdo a $q_2 = 250 e^{-0,5u_2}$, $q_4 = 500 e^{-0,5u_4}$.

En las figuras 19 y 20 se puede ver el mapa de tiempo de viaje, en horas, desde todo punto de la ciudad hacia los centros 2 y 4, respectivamente, y en las figuras 21 y 22, la demanda de viajes hacia los mismos centros.

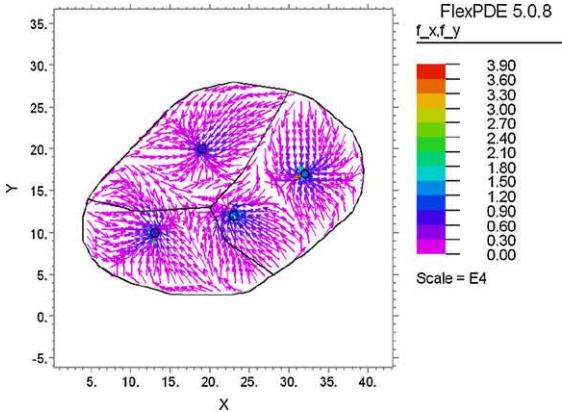


Figura 18. Distribución de flujo de vehículos en la ciudad (vehículos/hora/km).

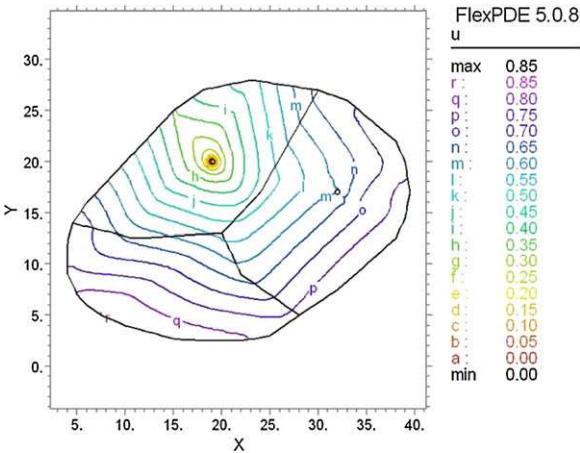


Figura 19. Tiempo de viaje hacia el centro 2 (horas).

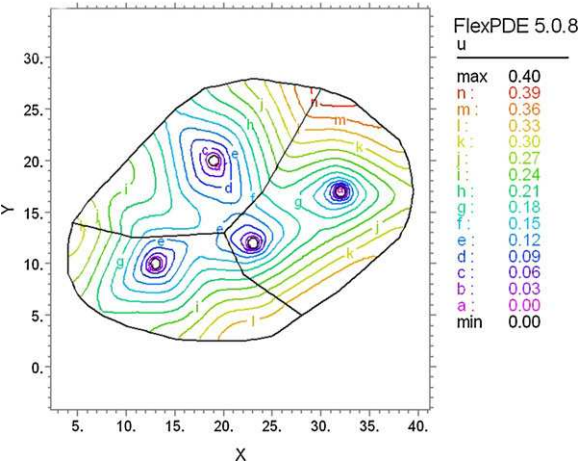


Figura 17. Tiempo de viaje (horas).

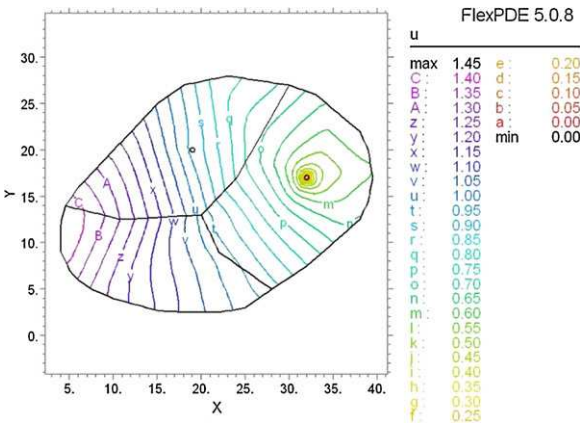


Figura 20. Tiempo de viaje hacia el centro 4 (horas).

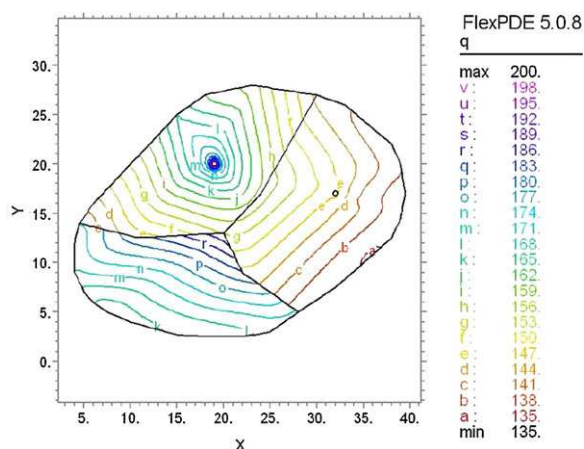


Figura 21. Demanda de viajes hacia el centro 2 (vehículos/hora/km²).

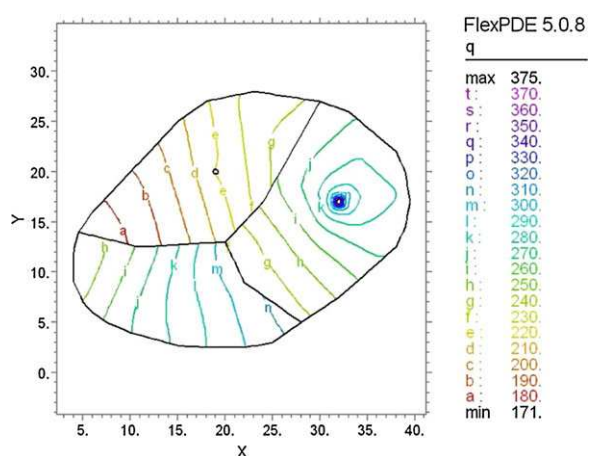


Figura 22. Demanda de viajes hacia el centro 4 (vehículos/hora/km²).

Ambos ejemplos ilustran cómo puede aplicarse este modelo a casos reales, así como cuán informativos pueden ser los mapas de tiempos de viaje y/o de densidades de flujo para visualizar el patrón general del tráfico urbano.

6. Conclusiones

Se ha desarrollado un modelo continuo para el estudio de la congestión del tráfico urbano. Específicamente se trata de una formulación continua para el problema de asignación de viajes urbanos (o de distribución-asignación) siguiendo el principio del equilibrio de usuario. Tal modelo considera las posibles características anisótropas de la red de transporte en diferentes zonas urbanas. A diferencia de formulaciones continuas previas, este enfoque se deduce mediante un proceso de homogeneización del problema discreto del equilibrio de usuario y por lo tanto se basa en el uso de funciones de tiempos de recorrido de arco perfectamente definidas desde el punto de vista experimental, tales como las fórmulas BPR. Esta misma idea hace posible recuperar las variables discretas por arco, una vez resuelto el problema continuo. El presente modelo se formula mediante un sistema de ecuaciones diferenciales de difusión anisótropa no lineal que se resuelve adecuadamente mediante el método de los elementos finitos con tiempos de cómputo mucho menores a los requeridos por el enfoque discreto clásico.

La concordancia con el enfoque discreto es muy buena, como ha sido demostrado en varios estudios comparativos. De esta manera este enfoque se presenta como una alternativa atractiva al clásico enfoque discreto para el análisis de redes densas. Asimismo es posible combinar el presente enfoque continuo con el modelo clásico (para considerar, por ejemplo, la existencia de autopistas). Esta y otras generalizaciones se presentarán en trabajos futuros por parte de los autores.

Agradecimientos

El presente trabajo es parte del proyecto «Modelos matemáticos en ingeniería ambiental: problemas directos e inversos» (Director: Dr. V.H. Cortínez, Secyt, Universidad Tecnológica Nacional). Asimismo forma parte del trabajo de tesis desarrollado por P.N. Domínguez, bajo la dirección de V.H. Cortínez, para obtener el título de Doctor en Ingeniería en el Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur.

V. H. Cortínez desea dedicar este trabajo a la querida memoria de su padre Víctor R. Cortínez (7/2/1931-9/9/2011), q.e.p.d.

Bibliografía

- [1] J. Wardrop, Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, Proceeding, Institution of Civil Engineers II (1952) 325–378.
- [2] M. Beckmann, C. Mc Guire, C. Weinstein, Studies in Economics of Transportation, Yale University Press, New Haven, Connecticut, 1956.
- [3] H. Poorzahedy, O. Rouhani, Hybrid meta-heuristic algorithms for solving network design problem, Eur. J. Oper. R. 182 (2007) 578–596.
- [4] J. Ying, H. Lu, J. Shi, An algorithm for local continuous optimization of traffic signals, Eur. J. Oper. R. 181 (2007) 1189–1197.
- [5] S. Chiou, Simultaneously optimizing link tolls and signal settings in a road network, Appl. Math. Modell. 33-35 (2009) 2311–2323.
- [6] Y. Sheffi, Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.
- [7] P. Domínguez, M. Vidal, V. Cortínez, Diseño óptimo de redes de transporte urbano considerando aspectos medioambientales, Mecánica Computacional XXVIII (2009) 2599–2624.
- [8] T. Sasaki, Y. Iida, Yang H, User Equilibrium Traffic Assignment by Continuum Approximation of Network Flow, en: 11th International Symposium of Transportation and Traffic Theory, Yokohama, Japan, 1990, pp. 233–252.
- [9] S. Wong, S. Sun, A combined distribution and assignment model for continuous facility location problem, Ann. Regional Sci. 35 (2001) 267–281.
- [10] H. Ho, S. Wong, B. Loo, Combined distribution and assignment model for a continuum traffic equilibrium problem with multiple user classes, Transp. Res. 40 (2006) 633–650.
- [11] H. Ho, S. Wong, B. Loo, A continuous traffic equilibrium model with multiple user classes, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies 3 (2003) 2831–2845.
- [12] H. Ho, Wong S, Two dimensional continuum modeling approach to transportation problems, Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology 6 (2006) 53–72.
- [13] V. Cortínez, P. Domínguez, Un modelo continuo de asignación de tráfico para el estudio de ruido urbano, en: Primeras Jornadas Regionales de Acústica Aadaa 2009, Rosario, Argentina, 2009.
- [14] P. Domínguez, V. Cortínez, Aplicación de un modelo continuo de distribución-asignación de tráfico urbano: impacto ambiental, II Congreso de Matemática Aplicada, Computacional e Industrial, MACI (2009) 277–280.
- [15] F. Robusté, E. Oñate, J. Ramos, Un modelo híbrido discreto-continuo para asignación de tráfico mediante algoritmos genéticos, en: IX Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, La Habana, Cuba, 1996.
- [16] U.S. Bureau of Public Roads, Traffic Assignment Manual, U.S. Department of Commerce, Washington D.C, 1964.
- [17] S. Wong, Y. Du, H. Ho, L. Sun, A simultaneous optimization formulation of a discrete/continuous transportation system, Workshop on Theory and Practice of Transportation Science (2002), China.
- [18] FlexPDE V. 6.08, PDE Solutions Inc., 2009.
- [19] M. Frank, P. Wolfe, An algorithm for Quadratic Programming, Nav. Res. Logist. Q. 3 (1-2) (1956) 95–110.